

# Pengaturan Injeksi Arus pada *Coilgun* dengan PWM menggunakan Metode Algoritma Genetika

Basuki Winarno

basuki@pnm.ac.id  
Teknik Elektro Universitas  
Brawijaya, Malang, Indonesia

Wijono

wijono@ub.ac.id  
Teknik Elektro, Universitas  
Brawijaya, Malang, Indonesia

Rini Nur Hasanah

rini.hasanah@ub.ac.id  
Teknik Elektro, Universitas  
Brawijaya, Malang, Indonesia

## Abstrak

Paper ini membahas tentang pengaturan injeksi arus pada *coilgun* untuk menghasilkan suatu profil kecepatan tertentu. Rancangan konstruksi koil yang diperlukan disusun dari 3 bagian area. Pergerakan proyektil dalam tiap area dibatasi oleh energi maksimal yang disediakan masing-masing koil sesuai kemampuan hantar arus konduktornya. Pengaturan *duty cycle* pada *pulse-width modulation* (PWM) digunakan untuk menghasilkan besar tegangan keluaran yang menentukan besar arus injeksi ke dalam koil. Arus yang diinjeksikan ke dalam koil diubah setiap 1 ms selama 24 ms, yaitu waktu tempuh proyektil dalam melewati 3 area, sesuai dengan kebutuhan energi yang berubah terhadap jarak. Jumlah *layer* pada masing-masing koil ditentukan secara iteratif untuk mempertimbangkan keterkaitan antar parameter koil. Injeksi arus pada ketiga koil dilakukan secara terpisah pada saat yang bersamaan, sehingga untuk setiap posisi proyektil tertentu dalam koil diperlukan pengaturan *duty cycle* yang berbeda. Algoritma genetika digunakan untuk keperluan tersebut. Setiap *duty cycle* dikodekan menggunakan bilangan biner 8 bit, sehingga untuk setiap injeksi diperlukan pengkodean menggunakan 3x8 bit, yang membentuk populasi *duty cycle*. Hasil penelitian menunjukkan untuk mencapai kesesuaian yang baik antara profil kecepatan gerak proyektil menggunakan metode yang diusulkan dan profil kecepatan yang digunakan sebagai acuan. Besar arus maksimal untuk koil 1 adalah 1460 A, koil 2 adalah 1752 A, dan koil 3 adalah 1898 A dengan kecepatan akhir sebesar 54,5 m/s.

**Kata Kunci** — 3-Stage Coil, Algoritma Genetika, *Coilgun*, *Duty Cycle*, *Linear Rank Selection*, Profil Kecepatan Proyektil.

## Abstract

*This paper discusses the control of injection current on a coil gun to produce a certain desired velocity profile. The required coil construction was composed of 3 parts. The projectile movement in each area was limited by the maximum energy supplied by each coil, corresponding to the current-carrying capability of the coil conductor. Duty cycle control of pulse-width modulation (PWM) was used to produce output voltage which determines the current to be injected into the coil. The current injected to the coils was changed every 1 ms during 24 ms, that is the time required by projectile moving through 3 areas, depending on the change in energy need along the path being passed through. The number of layers of each coil was determined iteratively to consider the interdependency among the coil parameters. The current injections into the three coils were done*

*separately, but at the same time, so that it was required a different control of duty cycle for different projectile positions. Genetic Algorithms was used to fulfil to proposed mechanism. Each duty cycle was encoded using 8-bit binary number, so that each injection required a 3x8 bits coding, which form the duty cycle population. The results showed for a good matching between the velocity profile obtained using the proposed method and the velocity profile being used as a reference. Maximum current for coil 1 is 1460A, coil 2 is 1752 A, and the coil 3 is 1898 A with final speed 54,5 m/s.*

**Keywords** — 3-Stage Coil, *Coilgun*, *Duty cycle*, *Genetic Algorithm*, *Linear Rank Selection*, *Projectile Velocity Profile*

## I. PENDAHULUAN

*Coilgun* merupakan sistem pelontar elektromagnetik yang terdiri atas rangkaian koil (*solenoid*) dengan suatu proyektil yang ditempatkan di dalamnya [1]. *Coilgun* bekerja dengan cara mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Secara struktur *coilgun* dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu *single-stage* dan *multi-stage*. *Coilgun* jenis *multi-stage* terdiri dari beberapa koil dan lebih unggul dibandingkan dengan jenis *single-stage* karena kecepatan proyektil dapat diatur secara lebih fleksibel. Selain melalui penambahan jumlah *stage*, untuk mempercepat laju proyektil dilakukan penambahan jumlah *layer* dan jumlah lilitan pada koil [2].

Perpindahan atau gerak proyektil dari keadaan diam sampai mencapai kecepatan tertentu membentuk sebuah profil kecepatan. Pengendalian kecepatan sulit dicapai dengan menggunakan *coilgun* jenis *multi-stage* yang seragam. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan modifikasi koil dengan menambah jumlah *layer* di tiap-tiap *stage* koil, untuk menghasilkan profil kecepatan yang diinginkan. Sebagai acuan digunakan profil kecepatan dari penelitian terdahulu [3].

Profil gaya menggambarkan karakteristik perubahan gaya yang diperlukan untuk menggerakkan proyektil sesuai profil kecepatan yang diharapkan. Gaya di sepanjang koil dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan besar medan magnet di setiap bagian koil. Besarnya medan magnet tergantung pada arus yang diinjeksikan ke dalam koil, sehingga pengaturan arus injeksi diperlukan untuk mendapatkan profil gaya tertentu. Mengingat bahwa untuk mendapatkan profil gaya dan kecepatan tersebut besarnya medan magnet sepanjang koil harus divariasi terhadap waktu, pengaturan arus injeksi di

setiap *stage* menjadi sulit dilakukan. Hal ini terjadi karena ketiga koil bekerja secara bersama-sama yang akan berfungsi untuk mendorong atau memperlambat proyektil.

Pengaturan arus di dalam penelitian ini berbasis pengaturan *duty cycle* PWM. Metode Algoritma Genetika digunakan pengaturan tersebut. Mekanisme ini digunakan untuk menentukan koil mana dan berapa lama harus diaktifkan sehingga proyektil mendapatkan gaya yang dibutuhkan untuk mencapai profil kecepatan yang diharapkan.

## II. RANCANGAN COILGUN

Perancangan *coilgun* terdiri dari perancangan sistem, perangkat lunak berbasis metode PWM dan algoritma genetika [4], yang selanjutnya diimplementasikan pada mikrokontroler untuk mengatur arus injeksi pada koil untuk menggerakkan proyektil.

### F. Konstruksi Koil

Konstruksi *coilgun* berupa susunan koil tidak seragam 3-*stage*. Proyektil terbuat dari bahan besi dengan bentuk silinder memiliki panjang ditentukan 25 mm dan diameter 11 mm. Konstruksi *coilgun* seperti ditunjukkan pada Gambar. 1.

Profil jarak dapat diperoleh dengan mengintegrasikan profil kecepatan. Profil kecepatan yang menjadi acuan berlangsung selama 24 ms, ditunjukkan pada Gambar. 2 [3].

Dengan menggunakan metode interpolasi polinomial [5], profil kecepatan pada Gbr. 2 dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$v(t) = -9,4812 \cdot 10^{16} \cdot t^8 + 7,1210 \cdot 10^{15} \cdot t^7 - 2,0528 \cdot 10^{14} \cdot t^6 + 2,8652 \cdot 10^{12} \cdot t^5 - 1,9710 \cdot 10^{10} \cdot t^4 + 5,7091 \cdot 10^7 \cdot t^3 - 5,5183 \cdot 10^3 \cdot t^2 - 3,3811 \cdot 10 \cdot t + 4,6799 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

Dengan mendiferensialkan terhadap waktu akan diperoleh profil percepatan, selanjutnya dengan memperhitungkan massa proyektil digunakan untuk mendapatkan profil gaya yang menentukan besarnya kebutuhan energi. Energi maksimal digunakan untuk menentukan jumlah *layer* koil yang diperlukan. Kawat enamel yang digunakan adalah AWG#8 [6]. Energi maksimal dihitung dengan menggunakan (2).

$$E = \int F(x) \cdot d(x) \quad (2)$$

Dengan mengintegrasikan profil kecepatan diperoleh jarak tempuh proyektil dan sebagai dasar perhitungan panjang koil. Diameter kawat enamel ( $D_k$ ) koil digunakan sebagai dasar perhitungan jumlah lilitan per koil ( $T_{PL}$ ). Jumlah *layer* dan jumlah lilitan digunakan untuk menentukan dimensi koil dan kebutuhan kawat enamel. Jari-jari luar koil ( $r_{out}$ ) mengacu pada (3), dengan ( $r_{in}$ ) merupakan jari-jari laras.

$$r_{out} = r_{in} + (2 \cdot n \cdot D_k) \quad (3)$$

Panjang kawat tiap-tiap koil mengacu pada (4) dan digunakan sebagai dasar perhitungan resistansi dan induktansi koil dengan ( $D_{L1}$ ) merupakan diameter koil *layer* ke-1.

$$P_{kn} = \pi \cdot T_{PL} \cdot (n \cdot D_{L1} + (n^2 - n) \cdot D_k) \quad (4)$$

Jumlah *layer* pada masing-masing koil dihitung dengan cara iterasi mengingat adanya keterkaitan antar parameter koil, sebagaimana ditunjukkan pada (5). Iterasi jumlah *layer* dilakukan sampai mendapatkan nilai energi maksimal dengan arus ( $I$ ) tidak boleh melebihi nilai *rating* konduktor yang diijinkan.

$$E = \frac{\mu_0 \cdot A}{2 \cdot l} \cdot I^2 \cdot (T_{PL} \cdot n \cdot Layer)^2 \quad (5)$$

### G. Sistem Coilgun

Konversi energi yang terjadi di dalam sistem *coilgun* adalah dari energi magnetik ke energi mekanik. *Duty cycle*  $\delta(t)$  merupakan masukan pada sistem untuk mendapatkan variasi arus injeksi yang akan menghasilkan fluks magnetik. Fluks tersebut dikonversi menjadi energi mekanik berupa pergerakan proyektil yang membentuk profil kecepatan.

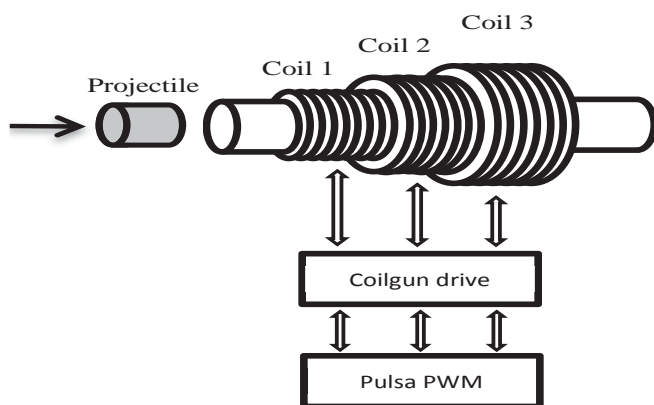
Perhitungan fluks magnetik menggunakan (6) [7].  $B(x)$  merupakan kerapatan medan magnet yang berubah disetiap posisi.  $\psi_1$  dan  $\psi_2$  merupakan sudut proyektil terhadap diameter luar di ujung masuk ke koil yang sudah dilewati dan ujung keluar koil yang belum dilewati.

$$B(x) = \left( \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot l} \right) (\cos \psi_1 + \cos \psi_2) \quad (6)$$

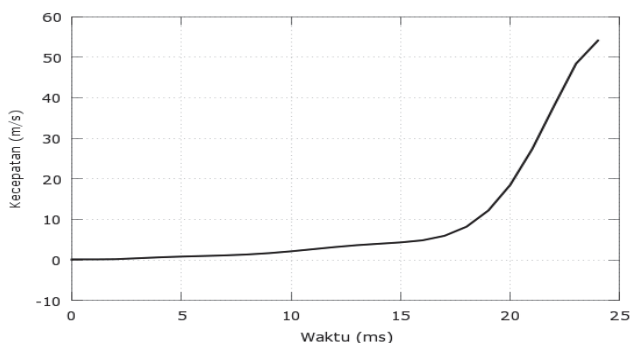
Sistem *coilgun* ditunjukkan pada Gambar. 3.



Gbr. 3 Sistem Coilgun



Gbr. 1 Konstruksi Koil



Gbr. 2 Profil kecepatan sebagai fungsi waktu yang menjadi acuan [3]

### H. Pengendalian Sistem *Coilgun*

Prinsip pengendalian sistem *coilgun* dengan mengkodekan *duty cycle*  $\delta(t)$  ke bilangan biner 3x8 bit. Hasil dari pengkodean digunakan dalam proses iterasi untuk mendapatkan besar arus yang dibutuhkan pada pengendalian sistem *coilgun*. Sedangkan  $H(\delta(t))$  merupakan fungsi transfer rangkaian *coilgun* menggunakan metoda Algoritma Genetika untuk mengatur *duty cycle* PWM dalam menentukan posisi on atau off dari ketiga koil yang bekerja secara bersamaan dalam waktu tertentu. Proses *encoding* selanjutnya diterapkan untuk menghasilkan nilai *duty cycle* arus injeksi yang akan menghasilkan profil fluks magnetik dan profil gaya yang bekerja pada proyektil. Profil gaya ini akan menghasilkan profil kecepatan yang merupakan keluaran sistem ( $v_{out}$ ). Sistem pengendalian *coilgun* ditunjukkan pada Gambar. 4.

### III. METODE PENGATURAN ARUS INJEKSI

Pengaturan arus dilakukan dalam rentang dari 0 sampai dengan besar arus maksimum ( $i_{max}$ ) berdasar pada kebutuhan energi di tiap-tiap koil. Arus maksimum digunakan sebagai parameter untuk menentukan besar tegangan yang diperlukan.

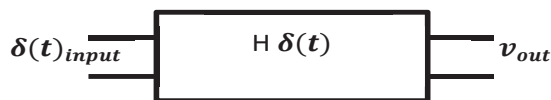
Range arus dibagi menjadi 5 *time-step*. Setiap *time-step* dibagi menjadi 10 *time-interstep*. Pengaturan arus injeksi di setiap periode injeksi arus ( $T_a$ ) dilakukan selama 1 ms. Injeksi arus memerlukan waktu total sebanyak 24 ms, sehingga diperlukan 24x periode injeksi ( $T_a$ ). Pengaturan besar arus injeksi menggunakan pada (7).

$$i_{ef} = i_{max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

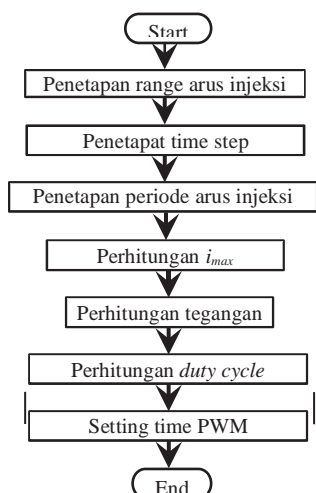
Arus setelah injeksi berhenti (pada saat gelombang PWM *off-state*) adalah seperti pada (8).

$$i_{ef} = i_{max} \cdot e^{-t/\tau} \quad (8)$$

Diagram alir pengaturan arus injeksi ditunjukkan pada Gambar. 5.



Gbr. 4 Pengendalian Sistem *Coilgun*



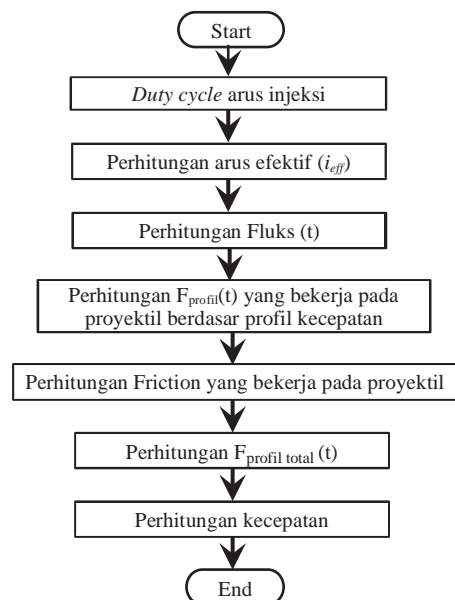
Gbr. 5 Diagram Alir Pengaturan Arus

Perhitungan *duty cycle* menghasilkan arus efektif yang digunakan untuk injeksi ke koil dan menghasilkan fluks magnetik. Fluks ini menghasilkan gaya untuk menggerakkan proyektil, yang juga dipengaruhi oleh gaya gesek (*friction*). Gaya total yang dihasilkan berpengaruh pada kecepatan gerak proyektil. Diagram alir perhitungan *duty cycle* dapat dilihat pada Gambar. 6.

Proses penerapan Algoritma Genetika diawali dengan membatasi jumlah generasi dalam 1 periode sebanyak 200. Pengkodean *duty cycle* ditetapkan secara *trial and error* sebanyak 30 kali dan dikumpulkan dalam sebuah populasi. Perhitungan kecepatan sebagai *objektif function* dilakukan dengan *duty cycle* sebagai masukan. Hasil perhitungan kecepatan dibandingkan dengan nilai kecepatan yang diinginkan. Perhitungan ini menghasilkan nilai *error* tertentu.

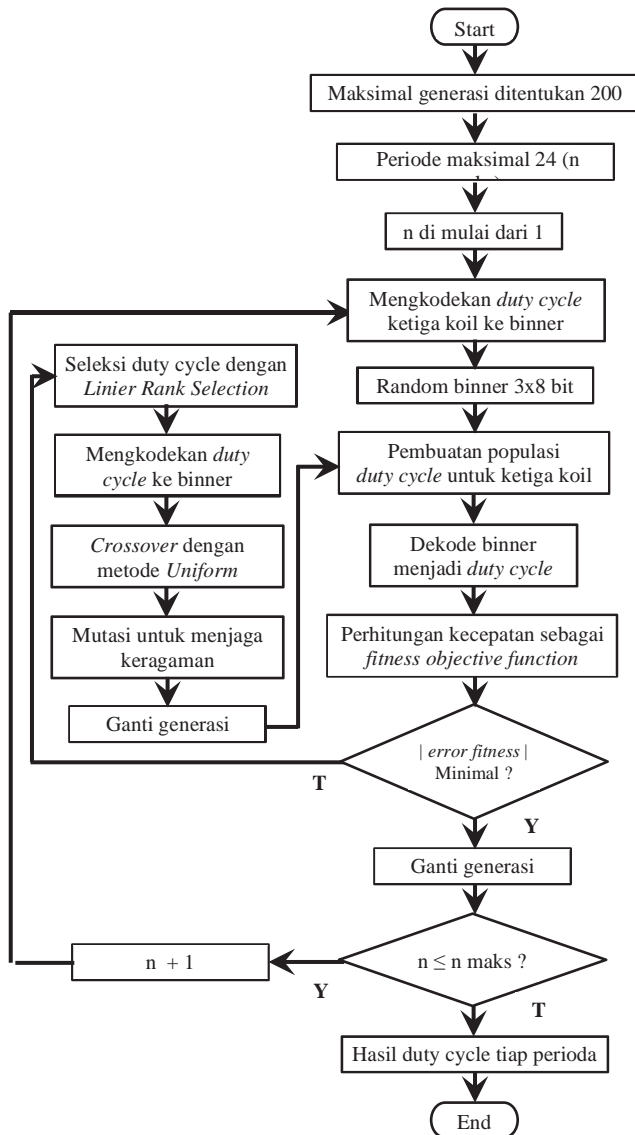
Metode *Linear Rank Selection* [8] digunakan untuk mencari urutan *duty cycle* yang terbaik sampai terjelek dan menunjukkan tingkat kesesuaian yang lebih tinggi terhadap profil kecepatan yang menjadi acuan dibandingkan dengan metode *Roulette Wheel Selection*, *Stochastic Universal Sampling* dan *Tournament Selection*.

Hasil seleksi *duty cycle* dikodekan menggunakan bilangan biner kemudian dilakukan proses *crossover* secara uniform untuk mendapatkan variasi *duty cycle*. Selanjutnya pada hasil penyilangan dilakukan mutasi untuk mendapatkan generasi berikutnya dan digunakan untuk membuat populasi *duty cycle* baru. Proses ini berlanjut terus sampai didapatkan *error* minimal dengan batas maksimal 200 generasi. Proses GA berlangsung sampai didapat nilai *duty cycle* untuk periode ke-1 sampai periode ke-24. Diagram alir metode Algoritma Genetika dapat dilihat pada Gambar. 7.



Gbr. 6 Diagram Alir Perhitungan *Duty cycle*





Gbr 7. Diagram alir algoritma genetika

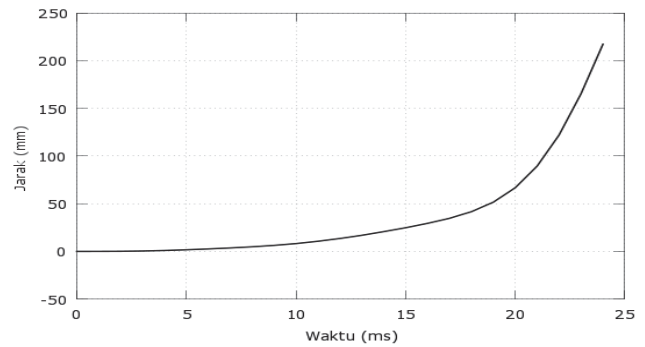
Simulasi di atas dilakukan juga dengan metode yang berbeda sebagai pembanding yaitu menggunakan metode rangkaian listrik. Software bantu yang digunakan adalah PSpice. Dari hasil perhitungan *duty cycle* selama 24 periode menggunakan Octave, diambil secara acak 2 periode untuk dipakai sebagai bahan perbandingan tersebut.

#### IV. HASIL RANCANGAN DAN ANALISIS

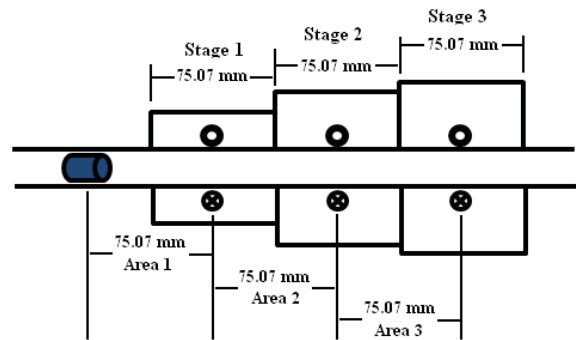
Profil jarak sebagai fungsi waktu diperoleh dengan mengintegrasikan profil kecepatan pada (1), didapatkan (9).

$$\begin{aligned}
 x(t) = & -1,0535 \cdot 10^{16} \cdot t^9 + 8,9013 \cdot 10^{14} \cdot t^8 \\
 & - 2,9326 \cdot 10^{13} \cdot t^7 + 4,7753 \cdot 10^{11} \cdot t^6 \\
 & - 3,9419 \cdot 10^9 \cdot t^5 + 1,4273 \cdot t^4 \\
 & - 1,8394 \cdot 10^3 \cdot t^3 - 1,6906 \cdot 10 \cdot t^2 \\
 & + 4,6799 \cdot 10^{-2} \cdot t
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

Profil jarak ditunjukkan pada Gambar. 8.



Gbr.8. Profil jarak sebagai fungsi waktu



Gbr.9. Rancangan koil 3-stage

TABEL I  
SPESIFIKASI KOIL

Spesifikasi	Koil 1	Koil 2	Koil 3
Jumlah lilitan	23	23	23
Jumlah layer	6	11	12
Jumlah lilitan total	138	253	276
Panjang koil	75,07mm	75,07mm	75,07mm
Panjang kawat	12,278m	35,480m	41,536m
Resistansi	0,18Ω	0,61Ω	0,72Ω
Induktansi	0,0036mH	0,1212mH	0,14422mH
Jari-jari luar koil	25,583mm	41,903mm	45,167mm
Energi maksimal	4,431J	19,246J	24,418J
Arus maksimal	1460A	1752A	1898A
Tegangan	263,2V	1061,6V	1368,6V

Jarak terjauh yang ditempuh dalam waktu 24 ms adalah  $x(24)=217,3$  mm. Rancangan koil terdiri dari 3 stage sehingga tiap koil memiliki panjang 72,33 mm. Kawat enamel menggunakan AWG#8 yang berdiameter 3,2639 mm sehingga diperoleh panjang tiap koil 75,07 mm dan panjang total koil 225,21 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar. 9.

Energi maksimal yang dibutuhkan di tiap area menentukan jumlah layer koil dihitung secara iteratif menggunakan (2) dengan arus tidak boleh melebihi arus *rating* konduktor yang diijinkan. Jari-jari luar koil dihitung menggunakan persamaan (3). Panjang kawat tiap koil dihitung menggunakan persamaan (4) dan sebagai dasar perhitungan resistansi dan induktansi [6]. Spesifikasi hasil rancangan koil selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 1

Metode Algoritma Genetika digunakan untuk mengatur 3 *duty cycle* injeksi arus sesuai kebutuhan profil kecepatan.





Pada periode kesatu, besar *duty cycle* untuk injeksi arus yang menghasilkan profil kecepatan mendekati profil acuan dicapai pada generasi ke-99 dengan *duty cycle* untuk koil 1 sebesar 23,921%, koil 2 sebesar 19,215% dan koil 3 sebesar 22,745%. Hasil pengaturan *duty cycle* untuk injeksi arus pada periode kedua, ketiga dan seterusnya ditampilkan pada Tabel 2.

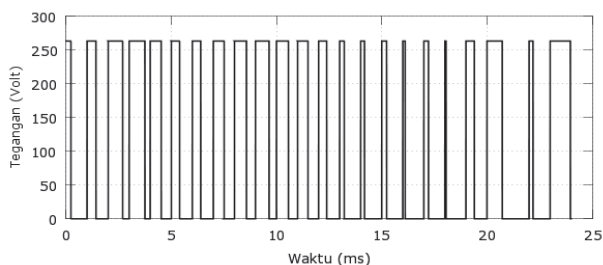
Pengaturan *duty cycle* untuk koil 1 di periode ke-1 sampai dengan ke-24, tegangan yang harus diberikan adalah 263,2 V dan menghasilkan kurva tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 10.

Arus maksimal yang diberikan untuk koil 1 sebesar 1460 A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 11.

Pengaturan *duty cycle* untuk koil 2 di periode ke-1 sampai dengan ke-24, tegangan yang harus diberikan adalah 1061,6V dan menghasilkan kurva seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 12.

TABEL II  
HASIL PENGATURAN VARIASI *DUTY CYCLE*

Periode	Wkt (ms)	<i>Duty cycle</i>			Generasi
		Koil 1 (%)	Koil 2 (%)	Koil 3 (%)	
1	1	23,921	19,215	22,745	99
2	2	42,745	21,568	72,549	36
3	3	1,000	74,117	89,411	1
4	4	49,803	74,902	62,353	59
5	5	55,294	22,353	43,529	149
6	6	41,176	10,196	2,353	102
7	7	39,608	73,333	96,078	103
8	8	47,843	78,431	72,941	18
9	9	57,255	52,549	41,176	162
10	10	79,608	0,000	9,804	12
11	11	54,510	86,667	12,941	98
12	12	45,882	9,412	1,569	32
13	13	37,255	76,078	78,039	18
14	14	20,392	6,667	6,274	168
15	15	15,686	78,823	92,941	11
16	16	21,961	3,922	25,098	171
17	17	3,529	80,784	98,823	1
18	18	20,392	7,843	1,569	40
19	19	16,078	96,078	78,039	1
20	20	40,000	5,098	52,941	190
21	21	72,157	87,843	73,725	1
22	22	18,039	88,627	80,000	1
23	23	39,216	37,255	98,039	153
24	24	52,549	24,706	38,823	52



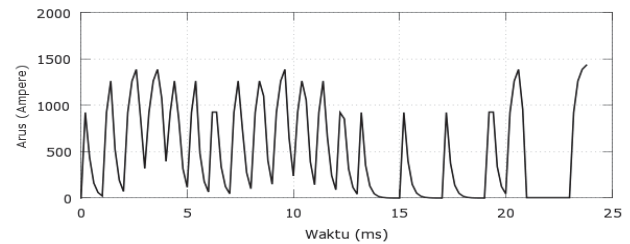
Gbr. 10 Tegangan pada koil 1 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24

Arus maksimal yang diberikan untuk koil 2 sebesar 1752A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 13.

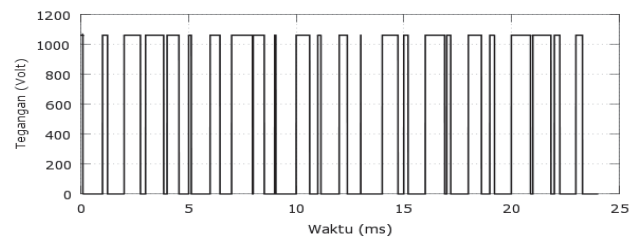
Pengaturan *duty cycle* untuk koil 3 di periode ke-1 sampai dengan ke-24, tegangan yang harus diberikan adalah 1368,6V dan menghasilkan kurva seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 14.

Arus maksimal yang diberikan untuk koil 3 sebesar 1898A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 15.

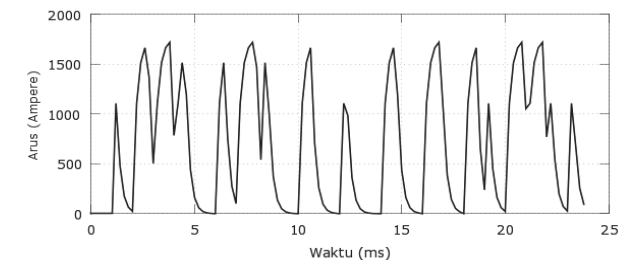
Hasil validasi pengaturan *duty cycle* periode ke-9 dan ke-10 pada koil 1 yang diambil secara acak dengan *duty cycle PWM* sebesar 57,26% pada periode ke-9 menghasilkan kurva arus yang eksponensial sesuai dengan persamaan (7) sampai mencapai nilai *steady state*. Selanjutnya injeksi dihentikan dan kurva arus jatuh secara eksponensial sesuai dengan (8).



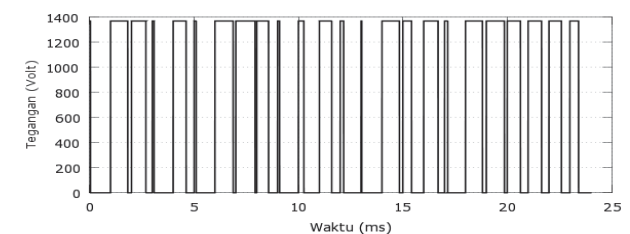
Gbr. 11 Kurva arus injeksi pada koil 1 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24



Gbr. 12 Tegangan pada koil 2 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24



Gbr. 13 Kurva arus injeksi pada koil 2 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24



Gbr. 14 Tegangan pada koil 3 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24

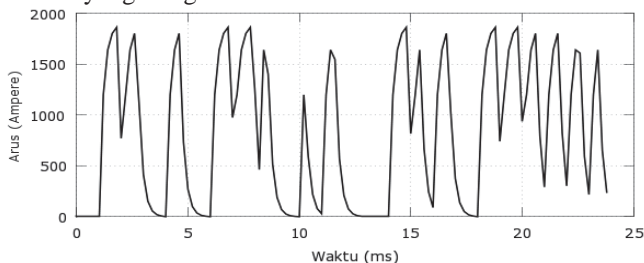
Demikian juga terjadi pada periode ke-10 dimana arus diinjeksikan ke koil menggunakan *duty cycle* 79,61%. Terlihat bahwa terdapat kesesuaian yang sangat baik antara kurva arus hasil simulasi menggunakan Octave, yang komputasinya berdasarkan persamaan-persamaan yang diturunkan dari bentuk fisik peralatan, dan hasil simulasi menggunakan PSpice, yang komputasinya dilakukan berdasarkan rangkaian listrik. Dengan demikian, metode yang diusulkan pada penelitian ini bisa digunakan sebagai alat untuk melakukan analisis pada sistem *coilgun* pada umumnya. Perbandingan pengaturan *duty cycle* menggunakan PSpice dan Octave ditunjukkan pada Gambar. 16.

Profil gaya target berdasarkan diferensial profil kecepatan tidak mengalami deviasi gelombang, sedangkan profil gaya hasil dari pengaturan injeksi arus pada ketiga koil mengalami deviasi gelombang dengan gaya maksimal sebesar 1099,8 N. Deviasi ini terjadi di setiap periode saat dilakukan injeksi arus, selanjutnya analisis dilakukan pada profil kecepatan. Profil gaya target dan profil gaya hasil injeksi arus ditunjukkan pada Gambar. 17.

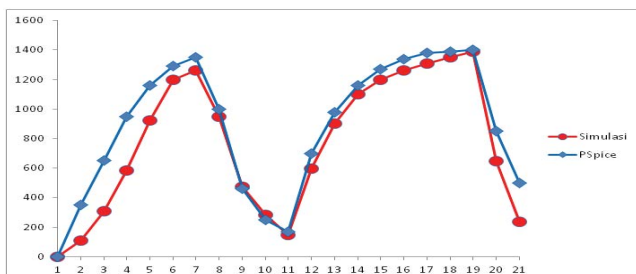
Profil kecepatan target berupa kurva interpolasi polinomial. Profil kecepatan sebagai fungsi waktu dari sistem *coilgun* yang dirancang menunjukkan adanya kesesuaian yang baik terhadap profil kecepatan yang digunakan sebagai target dengan kecepatan maksimal 54,5 m/s. Deviasi yang timbul bisa terjadi antara lain disebabkan sistem injeksi yang tidak kontinyu, yaitu injeksi PWM. Kurva profil kecepatan target dan kurva hasil injeksi arus ditunjukkan pada Gambar. 18.

## V. KESIMPULAN

Di dalam penelitian ini dapat disimpulkan telah berhasil dirancang *coilgun* dengan konstruksi koil tidak seragam. Konsep perancangan dimensi koil didasarkan pada energi yang dibutuhkan untuk melontarkan proyektil sesuai dengan perilaku yang diinginkan.



Gbr. 15 Kurva arus injeksi pada koil 3 dengan *setting duty cycle* dari periode ke-1 sampai dengan ke-24

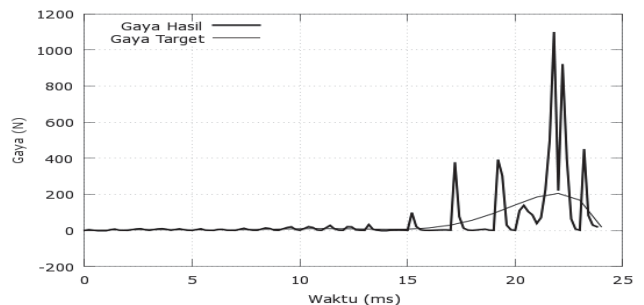


Gbr. 16 Perbandingan antara kurva arus menggunakan PSpice dengan hasil simulasi menggunakan Octave

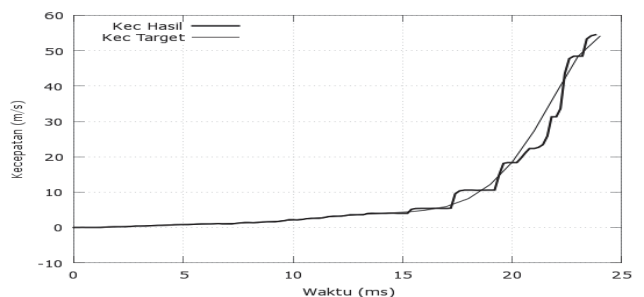
Pengaturan pergerakan proyektil didasarkan mekanisme pengaturan *duty cycle* PWM yang tidak konstan untuk menghasilkan nilai-nilai sesaat parameter di sepanjang jalur pergerakan proyektil. Oleh karena itu diperlukan komputasi yang di *update*. Metoda Algoritma Genetika yang digunakan dalam komputasi tersebut menunjukkan hasil yang sangat baik. Hal ini tampak dari profil kecepatan keluaran yang sangat sesuai dibandingkan dengan profil yang ditargetkan. Besar arus maksimal untuk koil 1 sebesar 1460 A, koil 2 sebesar 1752 A, dan koil 3 sebesar 1898 A dengan kecepatan maksimal 54,5 m/s.

## REFERENSI

- [1] J. Nett and L. Gernandt, "Inductive Acceleration of Moving Proyektils and Synchronization between the Driving Field and the Proyektil Motion," *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 31, No. 1, January 1995.
- [2] Z. Su, W. Guo, B. Zhang, M. Li, C. Zhang, and J. Li, "The feasibility study of high-velocity multi-stage induction coilgun," in *16<sup>th</sup> Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EML)*, 2012, p.1-4.
- [3] S.J.Lee, J.H.Kim, B.S.Song, and J.H. Kim, "Coilgun Electromagnetic Launcher (EML) Sistem with Multi-stage Electromagnetic Coils," *Journal of Magnetics*, vol.18(4), pp. 481-486, 2013
- [4] K.L.Shi and H.Li, "Optimized PWM Strategy Based on Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, No. 5, October 2005.
- [5] S. C. Chapra, R.P. Canale, and S. Sardy, "Metode Numerik untuk Teknik dengan Penerapan pada Komputer Pribadi," UI-Press, Jakarta, 1991.
- [6] (2014) The PowerStream website [Online]. Available: [http://www.powerstream.com/Wire\\_Size.htm](http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm)
- [7] R. Clarke. (2014). An introduction to the air cored coil. [Online]. Available: [http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air\\_coils.html](http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html)
- [8] K Jebari, M Madiafi, "Selection Methods for Genetic Algorithms," *Int. J. Emerg. Sci.*, vol.3(4), 333-344, December 2013.



Gbr. 17 Kurva gaya sebagai fungsi waktu



Gbr. 18 Kurva profil kecepatan sebagai fungsi waktu